

Моделирование характеристики передачи интегрального оптического волновода, нагруженного кольцевым резонатором

Г.А. Зарецкая¹, Н.А. Чеплагин¹, А.В. Дроздовский¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
Профессора Попова 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

Аннотация. При помощи модифицированной теории связанных мод с введением эффективных источников возбуждения исследована оптическая структура, состоящая из микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором. Представлены результаты моделирования характеристик передачи такой волноведущей структуры. В качестве материала волноводов использован нитрид кремния, окружающего пространства – оксид кремния. Рассмотрено влияние расстояния между волноводом и резонатором и значения оптических потерь в волноводах на характеристики передачи. Показано, что с увеличением расстояния между волноводом и резонатором происходит изменение режима работы резонатора от режима пересвязи, через критический режим, к режиму недосвязи. При этом положение резонансов сдвигается в область больших частот.

1. Введение

Базовыми составляющими элементами схем обработки радиосигналов могут выступать интегральные оптические микроволноводы, а также кольцевые оптические резонаторы, на основе которых в настоящее время реализованы системы фильтрации [1], перестраиваемые линии задержки [2], фазовращатели [3], чипы оптического формирования луча для фазированных антенных решеток [4, 5] и другие.

При расчете характеристик передачи таких интегральных устройств важно учитывать вклад, вносимый наличием связи резонатора с подводящей и отводящей линиями. В данной работе представлено исследование интегральной структуры, состоящей из оптического микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором (см. рисунок 1), в частности, исследовано влияние расстояния между волноводом и резонатором, а также значения оптических потерь в волноводах на характеристики передачи структуры. Также отметим, что актуальность моделирования подтверждается широким интересом в литературе по интегральной оптике и радиофотонике как к линейным [6-8], так и к нелинейным свойствам [9-11] интегральных кольцевых резонаторов.

2. Аналитическая теория связи оптического микроволновода с кольцевым резонатором

Аналитическая теория связи оптического микроволновода с кольцевым резонатором строится на аналитической теории потерь [12]. Полученные в рамках этой теории собственные решения в дальнейшем используются как элементы разложения по собственным модам прямоугольного волновода и последующим применением к ним модифицированной теории связанных мод,

предложенной в монографии [13]. Ключевой особенностью данной теории является введение эффективных источников возбуждения в терминах ортогональных дополнительных полей. Более подробно уравнения связанных мод и анализ характеристик передачи двух связанных оптических волноводов были рассмотрены в работе [14].

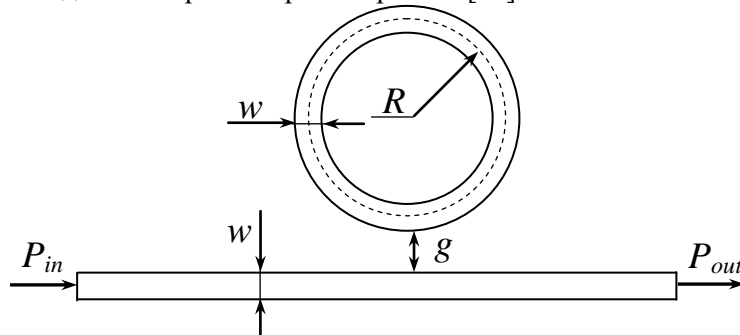


Рисунок 1. Схематическое изображение топологии оптического кольцевого резонатора.

В ходе решения задачи принято допущение, что радиус кольцевого резонатора много больше длины волны оптического излучения в рассматриваемом волноводе, то есть в области связи волноводы почти параллельны. Тогда, электромагнитные поля в волноводах могут быть представлены модальными полями в регулярном базовом неискривлённом волноводе. Для упрощения математической задачи использованы уравнения связанных мод для случая параллельных волноводов, состоящих из k отрезков. При этом начальная амплитуда на каждом отрезке была равна конечной амплитуде на предыдущем.

Значение коэффициента передачи микроволновода, нагруженного кольцевым резонатором получено при помощи метода парциальных волн и выглядит следующим образом:

$$R_{ring} = k_{11} + k_{12}^2 \cdot e^{-i\gamma L_{ring}} \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(k_{11} \cdot e^{-i\gamma L_{ring}} \right)^k \right). \quad (1)$$

где γ – комплексная постоянная распространения, учитывающая дисперсию и потери оптического микроволновода, $L_{ring} = 2\pi R$ – длина кольцевого резонатора, k_{11} и k_{12} – значения коэффициентов передачи по амплитуде на выходе из области связи (коэффициенты связи).

3. Результаты численного моделирования

На следующем этапе исследовано влияние расстояния между волноводом и кольцевым резонатором (g) на характеристики передачи исследуемой структуры. Результаты расчета частотной зависимости коэффициента передачи при различном значении расстояния между оптическим волноводом и кольцевым резонатором приведены на рисунке 2. При проведении расчетов в качестве материала волноводов выбран Si_3N_4 , окружающего пространства – SiO_2 .

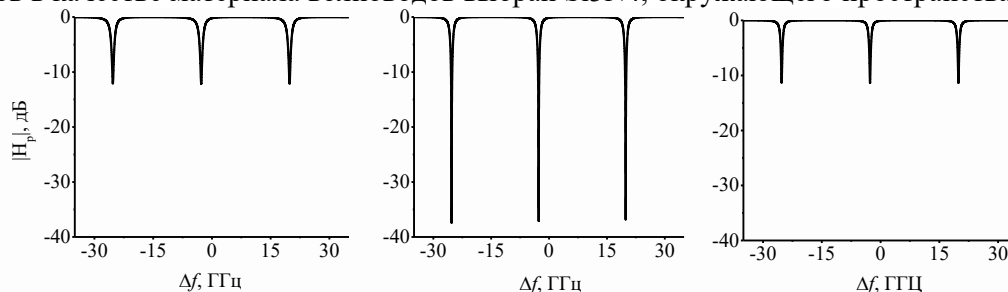


Рисунок 2. Частотная зависимость коэффициента передачи оптического волновода, нагруженного кольцевым резонатором; (а) – $g = 350$ нм, (б) – 400 нм, (в) – 450 нм.

Размеры поперечного сечения волноводов в структуре составляют $1,5 \times 0,7$ мкм, а радиус кольцевого резонатора равен 1 мм. Значение декремента затухания волноводов составляет 1 дБ/см.

Представленные частотные зависимости коэффициента передачи характеризуют работу резонатора в трех характерных режимах: в режиме недосвязи (рисунок 2(а)), в близком к критическому режиму (рисунок 2(б)) и в режиме пересвязи (рисунок 2(в)). На рисунках 2 частоте 0 ГГц, соответствует длине волны 1,55 мкм.

На рисунке 3 показана частотная зависимость коэффициента передачи второго резонанса в увеличенном масштабе. Из рисунка видно, что с увеличением расстояния между волноводом и резонатором происходит сдвиг резонансов в область высоких частот. Кроме того, значение частоты резонанса стремится к значению частоты собственных колебаний резонатора f_0 , а значение добротности к значению добротности ненагруженного резонатора Q_0 (см. рисунок 4).

Далее исследовалось влияние декремента затухания оптических микроволноводов на значение коэффициента передачи волновода, нагруженного кольцевым резонатором (см. рисунок 5). Как показывают расчеты, в режиме пересвязи при постепенном увеличении значения декремента затухания достигается критический режим работы резонатора и, соответственно, максимальное значение глубины резонансов. При дальнейшем увеличении значения декремента затухания резонатор выходит в режим недосвязи.

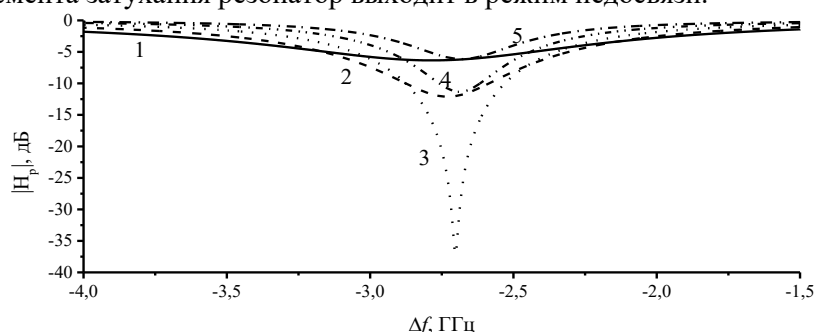


Рисунок 3. Частотная зависимость коэффициента передачи в увеличенном масштабе: 1) $g = 250$ нм, 2) $g = 300$ нм, 3) $g = 350$ нм, 4) $g = 400$ нм, 5) $g = 450$ нм.

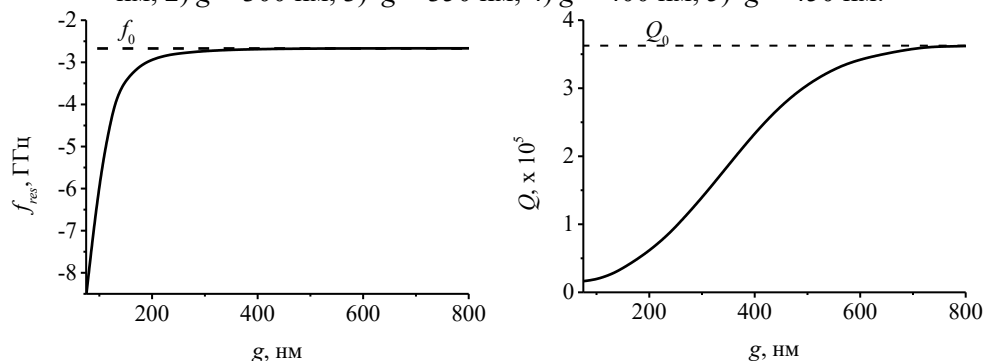


Рисунок 4. Зависимость значения резонансной частоты (а) и добротности кольцевого резонатора (б) при различном расстоянии g между волноводом и резонатором.

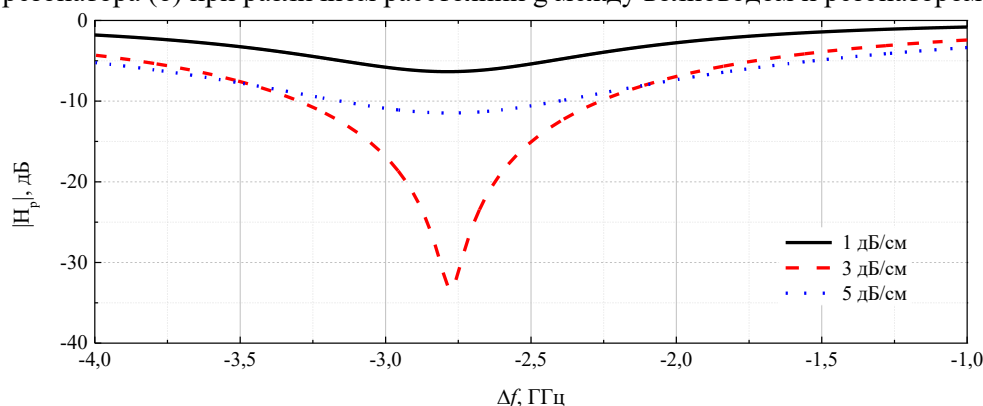


Рисунок 5. Частотная зависимость коэффициента передачи при различном значении декремента затухания волноводов; $g = 250$ нм.

4. Заключение

В настоящей работе теоретически исследована волноведущая структура, состоящая из микроволновода нагруженного кольцевым резонатором. Показано, что с увеличением расстояния между волноводом и резонатором происходит изменение режима работы резонатора от режима пересвязи, через критический режим, к режиму недосвязи. При этом положение резонансов сдвигается в область высоких частот и стремится к значению частоты собственных колебаний резонатора, одновременно значение добротности - к значению добротности ненагруженного резонатора. При постепенном увеличении значения декремента затухания резонатора, работающего в режиме пересвязи, достигается критический режим работы резонатора, а при дальнейшем увеличении значения декремента затухания резонатор выходит в режим недосвязи.

5. Благодарности

Работа поддержана проектом Министерства науки и высшего образования РФ.

6. Литература

- [1] Song, S. Tunable single passband microwave photonic filter using a cascaded pair of microring resonators // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2017. – P. 1-4.
- [2] Zhuang, L. Ring resonator-based single-chip 1×8 optical beam forming network in LPCVD waveguide technology // Proc. 11th IEEE/LEOS Symp. Benelux, Eindhoven, The Netherlands. – 2006. – Vol. 30. – P. 45-48.
- [3] Burla, M. On-chip CMOS compatible reconfigurable optical delay line with separate carrier tuning for microwave photonic signal processing // Optics Express. – 2011. – Vol. 19(22). – P. 21475-21484.
- [4] Yi, X. Integrated microwave photonics for wideband signal processing / X. Yi, S. Chew, S. Song // Photonics – Multidisciplinary Digital Publishing Institute. – 2017. – Vol. 4(4). – P. 46.
- [5] Marpaung, D. Towards a broadband and squint-free Ku-band phased array antenna system for airborne satellite communications // Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2011. – P. 2623-2627.
- [6] Burla, M. Ultra-high Q multimode waveguide ring resonators for microwave photonics signal processing // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2015. – P. 1-4.
- [7] Bauters, J.F. Ultra-low-loss high-aspect-ratio Si₃N₄ waveguides // Optics Express. – 2011. – Vol. 19(4). – P. 3163-3174.
- [8] Westerveld, W.J. Silicon photonic micro-ring resonators to sense strain and ultrasound – Delft, 2014. – 203 p.
- [9] Levy, J.S. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects // Nature Photonics. – 2010. – Vol. 4(1). – P. 37
- [10] Чуприна, И.Н. Оптимизация дисперсионных свойств кольцевого микрорезонатора / И.Н. Чуприна, А.А. Калачев // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 155-159. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-155-159.
- [11] Pfeiffer, H. Dynamics of soliton crystals in optical microresonators / H. Pfeiffer, H. Guo, W. Weng, J. Liu, T.J. Kippenberg // Nature Physics. – 2019. – Vol. 15(10). – P. 1071-1077.
- [12] Zaretskaya G.A. Influence of the geometric and physical parameters of the dielectric optical micro-waveguides with rectangular cross section on their losses // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1400(6). – P. 066010.
- [13] Barybin, A.A. Modern electrodynamics and coupled-mode theory: Application to guided-wave optics / A.A. Barybin, V.A. Dmitriev – Princeton (NJ): Rinton Press, 2002. – 700 p.
- [14] Зарецкая, Г.А. Влияние контраста показателей преломления на характеристики передачи недиссипативной системы, состоящей из двух идентичных оптических микроволноводов прямоугольного поперечного сечения / Г.А. Зарецкая, А.В. Дроздовский // Материалы V международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ) – Самара: Новая техника, 2019. – С. 212-217.

Transmission characteristics of ring resonator-loaded integrated optical waveguides

G.A. Zaretskaya¹, N.A. Cheplagin¹, A.V. Drozdovskii¹

¹Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», Professora Popova 5, St. Petersburg, Russia, 197376

Abstract. Transmission characteristics of the ring resonator-loaded optical waveguide are investigated. The studied structure consists of the silicon bus and ring waveguide cores and the silica cladding. The simulation results are obtained owing to the application of the modified coupled mode theory supplied by effective excitation sources. Influence of the separation distance between the waveguide and the ring resonator on transmission characteristics are considered, as well as the effect of material losses. It is demonstrated that with the distance growth the working regime changes from overcoupling via critical coupling to undercoupling with the simultaneous blueshift of resonance wavelengths.